

# 不同秸秆还田方式对春玉米产量、水分利用和根系生长的影响

隋鹏祥, 张文可, 梅楠, 田平, 王英俨, 孙悦, 孟广鑫, 苏业涵, 齐华

(沈阳农业大学农学院, 沈阳 110866)

**摘要:** 为探究耕作方式和秸秆还田对春玉米产量、土壤水肥及根系分布的影响,通过连续两年设置耕作方式(旋耕、翻耕)与秸秆还田方式(秸秆还田、秸秆不还田)两因素田间定位试验,研究了春玉米产量和水分利用效率、根系及土壤水肥分布的特性。结果表明:旋耕和翻耕处理春玉米产量和水分利用效率差异不显著,但前者显著增加了干旱年份(2015年)0—30 cm土层的根长密度、根表面积密度和根干重密度,而后者显著降低了10—30 cm土层的土壤容重和紧实度,降低了0—40 cm土层的土壤含水量、有效磷和速效钾含量,提高了干旱年份30—60 cm和湿润年份(2016年)0—60 cm土层的根长密度、根表面积密度和根干重密度;秸秆还田较秸秆不还田处理显著增加了春玉米产量和水分利用效率,增加幅度分别为9.5%和7.3%,促进了干旱年份0—60 cm土层的根长密度和湿润年份30—60 cm土层的根长密度、根表面积密度和根干重密度的增加,还提高了0—60 cm土层的土壤含水量、硝态氮、有效磷和速效钾含量。因此,实施旋耕秸秆还田和翻耕秸秆还田可以改善土壤水肥分布,促进深层根系发育,提高春玉米的产量和水分利用效率。

**关键词:** 秸秆还田; 产量; 水分利用效率; 根系; 土壤养分

**中图分类号:** S141.4; S152.7<sup>+</sup>5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2018)04-0255-07

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.04.040

## Effects of Different Straw Returning Methods on Spring Maize Yield, Water Use and Root Growth

SUI Pengxiang, ZHANG Wenke, MEI Nan, TIAN Ping,

WANG Yingyan, SUN Yue, MENG Guangxin, SU Yehan, QI Hua

(Agronomy College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866)

**Abstract:** To investigate the effects of tillage and straw management methods on spring maize yield, soil water and nutrient contents and root distribution, field experiments including two factors of tillage (rotary tillage, tilling) and straw management (straw returning to the field and straw removed) were conducted during two consecutive years. Spring maize yield, water use efficiency, soil nutrient and root distribution were analyzed. The results showed that two tillage treatments had the same yield and water use efficiency, and rotary tillage increased the root length density, root surface area density and root dry density of the 0—30 cm soil layers in the drought year (2015), while tilling significantly reduced bulk density and soil penetration resistance of the 10—30 cm soil layer, and reduced soil moisture content, soil available phosphorus content and soil available potassium content of the 0—40 cm soil layer, increased the root length density, root surface area density and root dry weight density of 30—60 cm soil layer in drought year and those of 0—60 cm soil layer in wet year (2016). The straw returning treatment increased spring maize yield by 9.5% and water use efficiency by 7.3%, and it promoted root length density of 0—60 cm soil layer in 2015, and increased root length density, root surface area density and root dry weight density of 30—60 cm soil layer in 2016. Meanwhile, straw returning increased the contents of soil water, nitrate nitrogen, available phosphorus and available potassium in the 0—60 cm soil layer. Overall, rotary and tilling tillage with straw returning can improve the distribution of soil water and fertilizer, and promote root growth in deep soil layers, increase yield and water use efficiency of spring maize.

**Keywords:** straw returning; yield; water use efficiency; root system; soil nutrient

东北春玉米区是我国最大的玉米产区,该区玉米秸秆年产量(6 849 万 t)占全国玉米秸秆总量的31.0%<sup>[1]</sup>。

该区玉米秸秆资源利用方式主要为燃料、饲料和秸秆还田,分别占35.4%,30.8%和19.8%<sup>[2]</sup>。秸秆还田

收稿日期:2018-02-28

资助项目:公益性行业(农业)科研专项(201503116);国家重点研发计划项目(2016YFD0300103,2016YFD0300801)

第一作者:隋鹏祥(1990—),男,博士研究生,主要从事耕作制度原理与技术研究。E-mail:suipengxiang1990@163.com

通信作者:齐华(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事耕作制度原理与技术研究。E-mail:qihua10@163.com

是改善农田土壤水肥条件,提高土壤质量的保护性耕作措施<sup>[3]</sup>。它在增加作物产量、产量稳定性、土壤蓄水保墒能力和土壤养分有效性等方面的作用已被许多研究<sup>[4-5]</sup>证实。

玉米根系是吸收土壤水分和养分的主要器官,其大小及在土壤中的分布影响地上部干物质积累和产量形成。浅耕秸秆还田能增加表层土壤通气性,改善土壤结构,提高土壤持水性能,但犁底层的存在限制了根系向下生长<sup>[6-8]</sup>。深耕秸秆还田能打破犁底层,降低耕层土壤容重和紧实度,促进土壤蓄水保墒,有利于根系下扎利用深层的水分和养分<sup>[4,9-11]</sup>。

在东北春玉米区,气候的恶化和多年浅旋耕增施化肥造成的春旱、土壤紧实、土壤板结和有机质下降等问题,是限制该区玉米增产的重要因素<sup>[12]</sup>。现有条件下,秸秆还田仍然是改善该区域农田土壤结构和功能障碍的最佳途径。本研究于 2015—2016 年在东北南部棕壤区设置试验,研究不同耕作方式和秸秆还田对春玉米产量、土壤水肥和根系分布的影响,为优化东北春玉米区秸秆还田方式提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验于 2015—2016 年在辽宁省铁岭市蔡牛镇进行(42°21'N,123°35'E),海拔 74 m。供试农田为棕壤土,前茬作物为玉米,耕层(0—20 cm)土壤容重 1.36 g/cm<sup>3</sup>,土壤 pH 6.36,有机质含量 16.4 g/kg,全氮含量 1.1 g/kg,硝态氮含量 8.6 mg/kg,有效磷含量 8.2 mg/kg,速效钾含量 141.5 mg/kg。5—9 月为作物生长季,2015 年、2016 年及 1994—2014 年平均降水量为 356,829,543 mm(图 1)。

### 1.2 试验设计

供试品种为郑单 958,种植密度为 67 500 株/hm<sup>2</sup>,5 月 1 日播种,10 月 1 日收获。试验采用裂区设计,设耕作方式和秸秆还田两因素。其中耕作方式为主因素(T),设旋耕(RT)和翻耕(PT)。副因素为秸秆还田(S),设秸秆还田(+S)和秸秆不还田(-S)。2015 年 4 月和 10 月分别做春耕和秋耕秸秆还田处理,旋耕还田 15 cm,翻耕还田 30 cm,秸秆还田后旋耕起垄。秸秆还田量均为 6 000 kg/hm<sup>2</sup>。还田的秸秆长度为 2~20 cm(收割机打碎后,又经过灭茬机再次处理)。氮、磷、钾肥用量为 N 225 kg/hm<sup>2</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg/hm<sup>2</sup>,K<sub>2</sub>O 225 kg/hm<sup>2</sup>,1/3 氮和全部磷钾肥做基肥,在播种时侧深施(深度 10 cm)。2/3 氮在大喇叭口期追施。氮、磷肥分别为尿素(N 46.4%)和磷酸二铵(N 18%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%),钾肥为氯化钾(K<sub>2</sub>O 60%)。小区行长 10 m,行距 0.6 m,16 行区,小区面积 96 m<sup>2</sup>,3 次重复,共 12 个小区,随机排列。

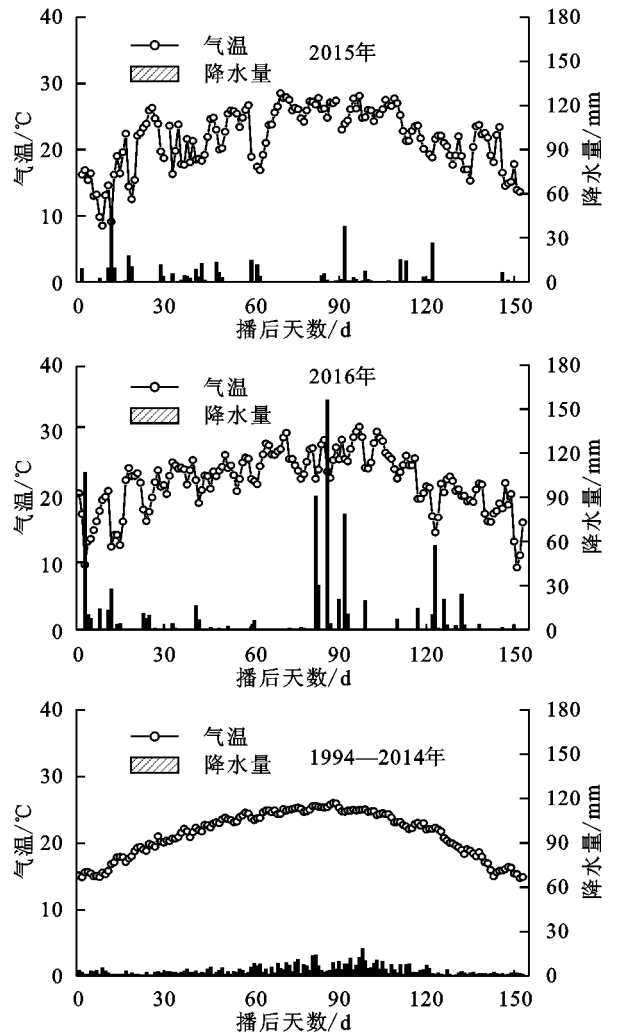


图 1 2015 年、2016 年及 1994—2014 年平均春玉米生长季日均气温与累积降水量

### 1.3 观测项目与方法

1.3.1 产量及其构成因素 在玉米收获期,各小区选取有代表性的 10 穗玉米果穗,待风干后于室内考种,观测籽粒重、穗粒数、百粒重,利用 PM-8188-A 型谷物水分测定仪测定籽粒水分,并折算 14%含水量产量。

1.3.2 干物质积累量 在玉米的吐丝期、成熟期各处理分别选取 3 株具有代表性植株的地上部分,置于样品袋中于 105 ℃烘箱杀青 30 min,75 ℃烘至恒重,冷却至室温后用百分之一天平称量。

1.3.3 根系分布 在玉米吐丝期,各处理选取代表性的 3 株植株,采用土壤剖面挖根法采集玉米根系。以采样玉米植株为中心两侧各 1/2 株距(12.7 cm)和 1/2 行距(30 cm),距地表每 10 cm 为 1 层采集 6 层。分别置于网袋中,拣根、冲洗后用加拿大产 SINTEK-LC-4800 型根系扫描仪进行扫描,随后利用根系分析软件 WinRHI2.0 Pro 2012 进行根系指标的分析。并将扫描后的根系置于烘箱(80 ℃)中烘干至恒重,用万分之一天平称量根干重。

1.3.4 土壤理化指标 播前和收获后,采用烘干法测定 0—200 cm 土壤含水量,采用环刀法测定 0—200 cm 土壤容重,用 SC-900 土壤紧实度仪测定 0—40 cm 土壤紧实度。收获后利用土钻采集行间 0—60 cm 土壤,土壤硝态氮含量采用 2 mol/L KCl 浸提后使用 Smartchem 200 全自动智能分析仪测定;有效磷含量采用碳酸氢钠—钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用火焰光度计法测定<sup>[13]</sup>。

1.3.5 农田耗水量和水分利用效率计算方法 采用水分平衡法计算农田耗水量,本试验地势平坦,地下水埋深 4 m 以下,降水入渗深度不超过 2 m。因此,可视为无地表径流、渗漏和地下水补给,则通用公式<sup>[4]</sup>为:

$$ET=I+P+U+R+F\pm\Delta W$$

式中: $I$ 为时段内灌水量(mm); $R$ 为地表径流量(mm); $U$ 为地下水通过毛细管作用上移补给作物水量(mm); $F$ 为补给地下水量(mm)值忽略不计,公式简化为: $ET=P\pm\Delta W$ 。式中: $ET$ 为农田耗水量(mm); $P$ 为时段内有效降水量(mm); $\Delta W$ 为时段内土壤贮水消耗量(mm)。

$$\Delta W=10\sum_{i=1}^n\gamma_i H_i(\theta_{i1}-\theta_{i2})$$

式中: $i$ 为土层编号; $n$ 为总土层数; $\gamma_i$ 为第 $i$ 层土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $H_i$ 为第 $i$ 层土壤厚度(cm); $\theta_{i1}$ 和 $\theta_{i2}$

分别为第 $i$ 层土壤时段初和时段末的含水量,以占干土重的百分数表示,本试验中测定深度是 200 cm。而  $WUE=GY/ET$ <sup>[4]</sup>。 $WUE$ 为籽粒产量水分利用效率( $\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{mm})$ ); $GY$ 为籽粒产量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。

## 1.4 数据统计分析

利用 Excel 2010 进行数据整理,SPSS 18.0 软件进行方差分析(ANOVA)和处理间显著性检验(Duncan's),Origin 8.0 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 耕作方式和秸秆还田对春玉米产量及其构成因素、干物质积累量的影响

由表 1 可知,耕作方式间春玉米产量及产量构成因素、干物质积累量差异不显著。秸秆还田显著影响春玉米产量、穗粒数、总干物质积累量、吐丝前干物质积累量和吐丝后干物质积累量。秸秆还田处理春玉米产量显著高于秸秆不还田,在干旱年份(2015 年)和湿润年份(2016 年)产量分别提高了 13.7%和 5.3%( $p<0.05$ )。秸秆还田处理显著增加了穗粒数、总干物质积累量、吐丝前干物质积累量和吐丝后干物质积累量,增加幅度分别为 25.5%、9.6%、11.7%和 8.2%。耕作方式、秸秆还田及其交互间百粒重和收获指数差异不显著。

表 1 耕作方式和秸秆还田对春玉米产量及其构成因素、干物质积累量的影响

年份	处理	产量/ ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	百粒重/ g	穗粒数	单株总干物质 积累量/g	吐丝前单株干物质 积累量/g	吐丝后单株 干物质积累量/g	收获 指数
2015	RT	7671b	30.4a	334b	206.9ab	80.9ab	126.0ab	0.55a
	PT	7196b	27.6a	343b	183.2b	75.0b	108.2b	0.55a
	RTS	8738a	28.5a	493a	233.1a	97.9a	135.2a	0.56a
	PTS	8171a	27.9a	469a	222.7a	93.5a	129.2ab	0.56a
	T	0.400	0.276	0.837	0.067	0.073	0.188	0.986
	S	0.001	0.593	0.003	0.003	0.004	0.024	0.227
	T×S	0.702	0.495	0.648	0.432	0.443	0.591	0.997
2016	RT	10897a	36.3a	465b	313.5c	131.7b	181.8b	0.55ab
	PT	10959a	36.0a	496b	325.2b	136.6ab	188.6ab	0.54ab
	RTS	11427a	35.3a	542a	329.2b	138.3a	190.9ab	0.56a
	PTS	11590a	33.7a	551a	342.8a	144.0a	198.8a	0.53b
	T	0.814	0.161	0.173	0.052	0.064	0.055	0.412
	S	0.023	0.382	0.001	0.003	0.001	0.004	0.063
	T×S	0.603	0.554	0.403	0.767	0.861	0.758	0.411

注:RT为旋耕秸秆不还田;PT为翻耕秸秆不还田;RTS为旋耕秸秆还田;PTS为翻耕秸秆还田;T为耕作方式;S为秸秆还田;同列数字后不同小写字母表示处理间差异显著( $p<0.05$ )。下同。

### 2.2 耕作方式和秸秆还田对春玉米根系分布的影响

耕作方式、秸秆还田和土层深度均显著影响春玉米吐丝期根系分布( $p<0.05$ ) (表 2)。春玉米根长密度、根表面积密度和根干重密度主要集中在 0—20 cm 土层,且随土层深度增加逐渐降低(图 2)。在干旱年份(2015 年),旋耕处理在 0—30 cm 土层中的根长密度、根表面积密度和根干重密度均显著高于翻耕,而在 30—60 cm 土层,趋势则相反( $p<0.05$ )。秸秆还田处理在 0—60 cm 土层中的根长密度较秸秆不还田显著提高了 20.9% ( $p<0.05$ )。在湿润年份(2016 年),翻耕处理在 0—60

cm 土层中的根长密度、根表面积密度和根干重密度均显著高于旋耕( $p<0.05$ )。秸秆还田处理在 30—60 cm 土层中的根长密度、根表面积密度和根干重密度较秸秆不还田分别提高了 23.4%、24.9%和 20.6% ( $p<0.05$ )。

### 2.3 耕作方式和秸秆还田对土壤养分分布的影响

耕作方式、秸秆还田和土层深度均显著影响土壤养分分布( $p<0.05$ ) (表 2)。受施肥作用的影响,表层土壤养分含量最高,且随土层深度的增加逐渐降低(表 3)。旋耕处理 0—40 cm 土层有效磷和速效钾含量显著高于翻耕,提高幅度分别为 28.2%和 7.5%

( $p < 0.05$ )。秸秆还田处理在 0—60 cm 土层中的硝态氮、有效磷和速效钾含量较秸秆不还田显著提高了

23.2%, 12.5% 和 6.8% ( $p < 0.05$ ), 而且湿润年份的  
提高幅度大于干旱年份。

表 2 耕作方式、秸秆还田和土层深度对春玉米根系及土壤养分分布影响的方差分析

年份	处理	根长密度	根表面积密度	根干重密度	硝态氮	有效磷	速效钾
2015	耕作方式(T)	<0.001	<0.001	<0.001	0.181	<0.001	<0.001
	秸秆还田(S)	<0.001	0.004	0.901	0.008	<0.001	<0.001
	土层深度(D)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	T×D	<0.001	<0.001	<0.001	0.018	<0.001	0.002
	S×D	0.012	0.182	0.994	0.003	0.037	<0.001
	T×S	0.065	0.303	0.909	0.173	0.962	0.155
	T×S×D	0.036	0.177	0.929	0.086	0.849	<0.001
2016	耕作方式(T)	<0.001	<0.001	<0.001	0.196	<0.001	<0.001
	秸秆还田(S)	0.004	0.056	0.054	<0.001	<0.001	<0.001
	土层深度(D)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	T×D	<0.001	0.003	0.019	0.036	<0.001	<0.001
	S×D	0.019	0.775	0.794	<0.001	<0.001	<0.001
	T×S	0.013	0.845	0.694	0.170	<0.001	<0.001
	T×S×D	0.001	0.027	0.395	0.001	<0.001	0.099

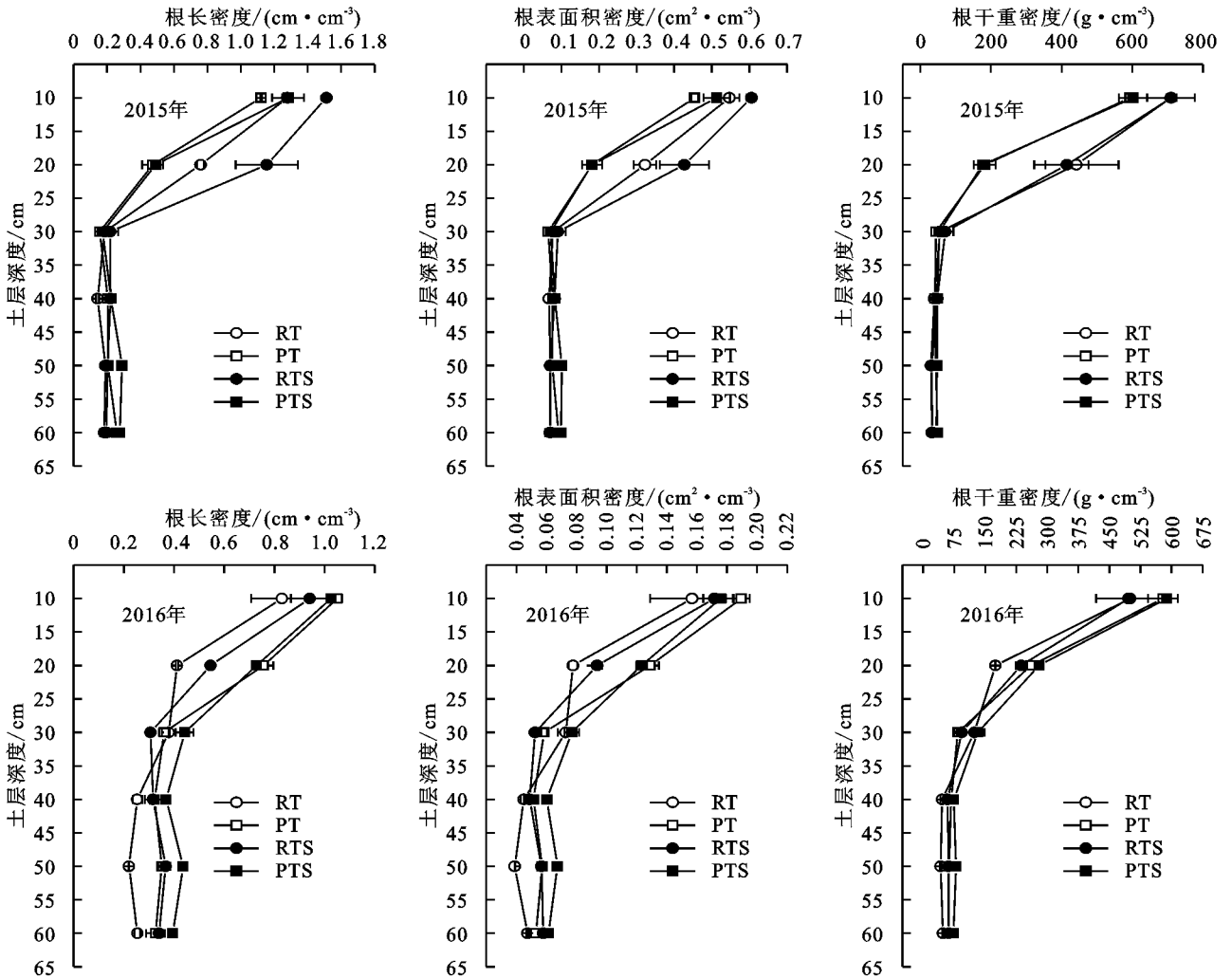


图 2 耕作方式和秸秆还田对春玉米根系分布的影响

2.4 耕作方式和秸秆还田对土壤物理性状的影响

耕作方式、秸秆还田和土层深度均显著影响土壤含水量、容重和紧实度的分布 ( $p < 0.05$ ) (表 4)。土壤含水量、容重和紧实度均随着土层深度的增加,表现出先增加后降低的趋势(图 3)。翻耕处理较旋耕显著降低了播种前和收获后 10—30 cm 土层的

土壤容重和紧实度,降低了播种前 0—100 cm 和收获后 0—60 cm 土层的土壤含水量,降低幅度分别为 7.4%, 32.7% 和 4.6%, 6.6% ( $p < 0.05$ )。秸秆还田处理播种前 0—100 cm 和收获后 0—60 cm 土层的土壤含水量均显著高于秸秆不还田,分别提高了 10.6% 和 9.6% ( $p < 0.05$ )。

表 3 耕作方式和秸秆还田对土壤养分分布的影响

单位:mg/kg

土层深度/cm	处理	2015 年			2016 年		
		硝态氮	有效磷	速效钾	硝态氮	有效磷	速效钾
0—20	RT	7.8b	10.2a	143a	10.6b	15.8b	139b
	PT	8.5ab	8.2b	126b	10.3b	12.8c	125c
	RTS	8.9ab	10.8a	138a	14.6a	19.0a	187a
	PTS	9.5a	8.9b	147a	13.9a	13.8c	154b
20—40	RT	4.2a	0.3b	136a	4.2b	0.4ab	105b
	PT	3.6a	0.2b	128ab	5.7a	0.3b	115b
	RTS	3.5a	0.4a	141a	6.5a	0.6a	130a
	PTS	4.1a	0.3b	123b	6.2a	0.4ab	123a
40—60	RT	1.7a	0.2a	156a	1.8b	0.2a	124c
	PT	1.5a	0.2a	161a	1.6b	0.2a	136b
	RTS	1.9a	0.2a	145b	2.6a	0.3a	142a
	PTS	1.6a	0.2a	125c	2.5a	0.2a	144a

表 4 耕作方式、秸秆还田和土层深度对土壤物理性质影响的方差分析

处理	播种前			收获后		
	土壤含水量	土壤容重	土壤紧实度	土壤含水量	土壤容重	土壤紧实度
耕作方式(T)	0.007	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.008
秸秆还田(S)	<0.001	0.452	0.201	<0.001	0.586	0.625
土层深度(D)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
T×D	0.274	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
S×D	0.729	0.595	0.831	<0.001	0.052	0.847
T×S	0.608	0.635	0.077	<0.001	0.414	0.625
T×S×D	0.986	0.944	0.306	<0.001	0.061	0.857

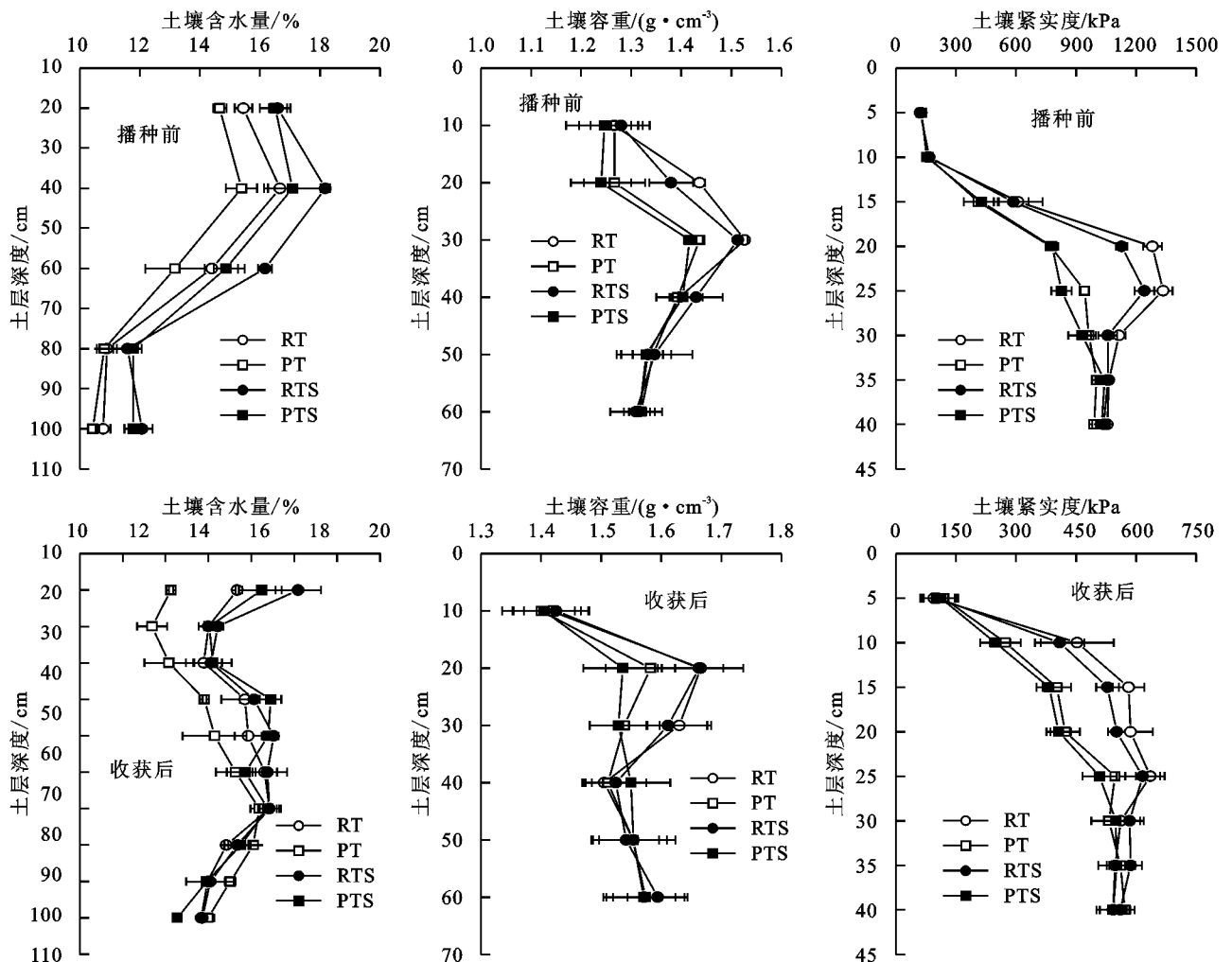


图 3 耕作方式和秸秆还田对土壤物理性质的影响

## 2.5 耕作方式和秸秆还田对水分利用效率的影响

耕作方式显著影响收获后土壤贮水量和耗水量, 秸秆还田显著影响播种前和收获后土壤贮水量、耗水量和水分利用效率( $p < 0.05$ ) (表 5)。旋耕较翻耕处理显著增加了收获后土壤贮水量, 降低了生育期内的耗水量( $p < 0.05$ )。秸秆还田处理显著增加了播种前和收获后的土壤贮水量, 降低了生育期内的耗水量, 促进了春玉米水分利用效率的提高, 提高幅度为 7.3% ( $p < 0.05$ )。

表 5 耕作方式和秸秆还田对 2016 年土壤贮水量、耗水量和水分利用效率的影响

处理	播前土壤 贮水量/mm	收获后土壤 贮水量/mm	降雨量/ mm	耗水量/ mm	水分利用效率/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ )
RT	434b	572b	829	691bc	15.9ab
PT	425c	530c	829	724a	15.1b
RTS	450a	597a	829	682c	16.8a
PTS	452a	574b	829	707b	16.4a
T	0.158	0.043		<0.001	0.126
S	0.004	<0.001		0.027	0.012
T×S	0.469	0.602		0.439	0.524

## 3 讨论

关于耕作方式结合秸秆还田对玉米产量影响的研究很多, 但不同土壤类型、气候区域所得结果存在差异。深翻或深松秸秆还田较浅耕秸秆还田对玉米有增产效应<sup>[11]</sup>, 但也有研究<sup>[7]</sup>表明, 秸秆还田条件下旋耕和翻耕玉米产量无显著差异, 甚至免耕秸秆覆盖增产更显著<sup>[14]</sup>。本研究结果表明, 旋耕和翻耕秸秆还田显著增加了春玉米产量, 而且在干旱年份增产效果更显著, 但两者间产量无显著差异。秸秆还田增加了春玉米产量主要是由于提高了穗粒数, 而且秸秆还田在干旱年份和湿润年份均显著提高了春玉米干物质积累量, 为增产奠定了基础。

土壤紧实胁迫严重限制了根系生长、分布和吸收功能, 进而影响了产量形成, 但根系可以通过增加比吸收表面和比活跃吸收表面等生理代谢过程, 减缓土壤紧实胁迫的伤害<sup>[15-17]</sup>。前人研究<sup>[10-11, 18]</sup>发现, 与免耕相比较, 深松或深翻能打破犁底层, 降低耕层土壤容重和紧实度, 增加根长密度、根表面积密度和根干物质重, 提高冬小麦和夏玉米产量。而 Muñoz-Romero 等<sup>[19]</sup>和 Nosalewicz 等<sup>[20]</sup>研究则表明, 免耕显著提高了干旱年份土壤贮水量, 通过增加冬小麦细根数量和根长, 提高了水分利用率而获得更高产量。本研究表明, 在干旱年份, 旋耕在 0—30 cm 土层中的根长密度、根表面积密度和根干重密度均高于翻耕处理, 而在 30—60 cm 土层趋势则相反。而秸秆还田对比不还田处理显著增加了 0—60 cm 根长密度。在湿润年

份, 翻耕在 0—60 cm 土层中的根长密度、根表面积密度和根干重密度均高于旋耕处理。秸秆还田对比不还田处理显著增加了底层 (30—60 cm) 的根长密度、根表面积密度和根干重密度。耕作结合秸秆还田可以创造良好的土壤结构、水分和养分条件, 利于玉米深层根系的生长发育, 易获取充足的水肥资源, 进而提高了地上部干物质积累量和产量形成<sup>[11]</sup>。

不同秸秆还田方式对微生物的种类和活性起调节作用, 从而影响秸秆腐解速率和土壤有效养分含量<sup>[21-24]</sup>。翻耕秸秆还田增加了土壤放线菌和好气性细菌数量<sup>[22-23]</sup>, 而免耕秸秆覆盖显著增加土壤真菌和嫌气性细菌数量<sup>[25]</sup>。秸秆还田能刺激微生物分泌参与土壤碳、氮、磷循环相关的水解酶, 随着秸秆的腐解, 提高了土壤碱解氮、有效磷和速效钾等有效养分含量<sup>[5, 22-24]</sup>。本研究结果显示, 秸秆还田显著增加了 0—60 cm 土层土壤硝态氮、有效磷和速效钾含量, 但干旱年份的增加幅度要低于湿润年份。主要是因为降雨等气候条件影响微生物利用秸秆资源, 在干旱年份, 微生物受土壤水分的影响, 活性较低, 秸秆腐解速率较慢, 而湿润年份, 微生物活性较强, 加快了秸秆腐解和养分释放<sup>[26]</sup>。

在雨养农业区, 年际间降雨量直接影响作物产量, 增产的关键在于提高土壤贮水量及作物水分利用效率。本研究中, 旋耕和翻耕秸秆还田后显著提高了播种前和收获后土壤贮水量, 有效降低了玉米生育期内的耗水量, 这与前人<sup>[4, 27]</sup>研究结果一致。而玉米根系形态性状 (总根长、根表面积和根干物质重) 中, 根长对水分利用效率的贡献最大<sup>[28]</sup>。秸秆还田处理在干旱和湿润年份均显著增加了深层土壤 (30—60 cm) 的根长密度, 通过提高对深层土壤水分的利用, 进而有更高的水分利用效率和实现增产。

## 4 结论

(1) 旋耕和翻耕处理春玉米产量和水分利用效率差异不显著, 但前者显著增加了干旱年份 0—30 cm 土层的根长密度、根表面积密度和根干重密度, 而后者显著降低了 10—30 cm 土层的土壤容重和紧实度, 降低了 0—40 cm 土层的土壤含水量、有效磷和速效钾含量, 提高了干旱年份 30—60 cm 和湿润年份 0—60 cm 土层的根长密度、根表面积密度和根干重密度。

(2) 秸秆还田较秸秆不还田处理显著增加了春玉米产量和水分利用效率, 促进了干旱年份 0—60 cm 土层的根长密度和湿润年份 30—60 cm 土层的根长密度、根表面积密度和根干重密度的增加, 还提高了 0—60 cm 土层中的土壤含水量、硝态氮、有效磷和速效钾含量。

## 参考文献:

- [1] 吕开宇,仇焕广,白军飞,等. 中国玉米秸秆直接还田的现状与发展[J]. 中国人口·资源与环境,2013,23(3):171-176.
- [2] 王如芳,张吉旺,董树亭,等. 我国玉米主产区秸秆资源利用现状及其效果[J]. 应用生态学报,2011,22(6):1504-1510.
- [3] Marie-Soleil T, Alicia S, Frédéric B, et al. Crop residue management and soil health: A systems analysis[J]. *Agricultural Systems*,2015,13(4):6-16.
- [4] 赵亚丽,薛志伟,郭海斌,等. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦—夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学,2014,47(17):3359-3371.
- [5] 隋鹏祥,张心昱,温学发,等. 耕作方式和秸秆还田对棕壤土壤养分和酶活性的影响[J]. 生态学杂志,2016,35(8):2038-2045.
- [6] 高建华,张承中. 不同保护性耕作措施对黄土高原旱作农田土壤物理结构的影响[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(4):192-196.
- [7] 孔凡磊,张海林,翟云龙,等. 耕作方式对华北冬小麦—夏玉米周年产量和水分利用的影响[J]. 中国生态农业学报,2014,22(7):749-756.
- [8] Muñoz-Romero V, Benítez-Vega J, López-Bellido R J, et al. Effect of tillage system on the root growth of spring wheat[J]. *Plant and Soil*,2010,326:97-107.
- [9] 杨永辉,武继承,张洁梅,等. 耕作方式对土壤水分入渗、有机碳含量及土壤结构的影响[J]. 中国生态农业学报,2017,25(2):258-266.
- [10] Guan D H, Al-Kaisi M M, Zhang Y, et al. Tillage practices affect biomass and grain yield through regulating root growth, root-bleeding sap and nutrients uptake in summer maize[J]. *Field Crops Research*,2014,157:89-97.
- [11] Mu X Y, Zhao Y L, Liu K, et al. Responses of soil properties, root growth and crop yield to tillage and crop residue management in a wheat-maize cropping system on the North China Plain[J]. *European Journal of Agronomy*,2016,78:32-43.
- [12] 郑洪兵,齐华,刘武仁,等. 玉米农田耕层现状、存在问题及合理耕层构建探讨[J]. 耕作与栽培,2014(5):39-42.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999:146-195.
- [14] 张海林,陈阜,秦耀东,等. 覆盖免耕夏玉米耗水特性的研究[J]. 农业工程学报,2002,18(2):36-40.
- [15] 王群,李潮海,李全忠,等. 紧实胁迫对不同类型土壤玉米根系时空分布及活力的影响[J]. 中国农业科学,2011,44(10):2039-2050.
- [16] 李潮海,李胜利,王群,等. 下层土壤容重对玉米根系生长及吸收活力的影响[J]. 中国农业科学,2005,38(8):1706-1711.
- [17] Lipiec J, Horn R, Pietrusiewicz J, et al. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species[J]. *Soil and Tillage Research*,2012,121:74-81.
- [18] Wang X B, Zhou B Y, Sun X F, et al. Soil tillage management affects maize grain yield by regulating spatial distribution coordination of roots, soil moisture and nitrogen status [J]. *PLoS One*, 2015, 10: e0129231.
- [19] Muñoz-Romero V, Benítez-Vega J, López-Bellido L, et al. Monitoring wheat root development in a rainfed vertisol: Tillage effect[J]. *European Journal of Agronomy*,2010,33:182-187.
- [20] Nosalewicz A, Lipiec J. The effect of compacted soil layers on vertical root distribution and water uptake by wheat[J]. *Plant and Soil*,2014,375:229-240.
- [21] 潘剑玲,代万安,尚占环,等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报,2013,21(5):526-535.
- [22] 李纯燕,杨恒山,萨如拉,等. 不同耕作措施下秸秆还田对土壤速效养分和微生物量的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(1):197-210.
- [23] 陈冬林,易镇邪,周文新,等. 不同土壤耕作方式下秸秆还田量对晚稻土壤养分与微生物的影响[J]. 环境科学学报,2010,30(8):1721-1728.
- [24] 王淑兰,王浩,李娟,等. 不同耕作方式下长期秸秆还田对旱作春玉米田土壤碳、氮、水含量及产量的影响[J]. 应用生态学报,2016,27(5):1530-1540.
- [25] Zhang B, He H, Ding X L, et al. Soil microbial community dynamics over a maize (*Zea mays* L.) growing season under conventional and no-tillage practices in a rainfed agroecosystem[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012,124:153-160.
- [26] Helgason B L, Gregorich E G, Janzen H H, et al. Long term microbial retention of residue C is site-specific and depends on residue placement[J]. *Soil Biology and Biochemistry*,2014,68:231-240.
- [27] 赵亚丽,郭海斌,薛志伟,等. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦—夏玉米轮作系统中干物质生产和水分利用效率的影响[J]. 作物学报,2014,40(10):1797-1807.
- [28] 慕自新,张岁岐,郝文芳,等. 玉米根系形态性状和空间分布对水分利用效率的调控[J]. 生态学报,2005,25(11):2895-2900.